

折叠式托盘箱货架弯曲的有限元分析及试验验证

王睿娜¹, 卢立新^{1,2}, 余渡元³, 韩变玲¹

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122;

3. 中包精力托盘系统共用有限公司, 北京 100088)

摘要: **目的** 市场上的托盘箱普遍根据经验设计, 其设计周期长, 成本高。拟研究利用有限元模拟托盘箱性能的可行性。**方法** 先利用三维软件 Solidworks 完成托盘箱的建模, 再导入有限元分析软件 Workbench 模拟其货架弯曲性能, 根据模拟结果修改模型, 直至满足要求后进行打样制造, 然后进行实际托盘箱样品的实验。**结果** 托盘箱货架弯曲的实验结果和模拟结果总体上吻合度较高, 托盘上 5 个试验位置挠度的相对误差随着载荷的增大而逐渐减小, 并趋于稳定。**结论** 使用有限元软件 Workbench 来进行托盘箱结构的设计和性能模拟分析是可行且有效的。

关键词: 托盘箱; 有限元分析; 试验验证

中图分类号: TB485.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)07-0034-05

Finite Element Analysis and Test Validation of Racking Bending in Folding Box Pallet

WANG Rui-na¹, LU Li-xin^{1,2}, YU Du-yuan³, HAN Bian-ling¹

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of

Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China;

3. Chinapack Jingli Pallet Pooling System Corporation, Beijing 100088, China)

ABSTRACT: **Objective** The design of box pallet is mostly experience-based, which has long design period and high cost. The aim of this study is to check the feasibility of simulation of box pallet performance using finite element analysis. **Methods** The modeling design of pallet was carried out by using Solidworks, and then finite element analysis of the model was carried on by using Workbench. The model was modified based on simulation results until it met the requirements, and then a sample was prepared for the racking bending experiment. **Results** The results showed that the simulation results of racking bending performance of the box pallet were similar with the experimental results. The relative error of five points decreased with the increase of pressure and was finally stabilized. **Conclusion** It was confirmed that the design of box pallet and simulation of racking bending performance of box pallet by workbench was feasible.

KEY WORDS: box pallet; finite element analysis; verification

随着物流技术的飞速发展, 托盘作为机械化装卸、运输和存储的单元工具, 对于运输散装货物或液体时, 仅靠托盘是难以实现的。托盘箱的出现解决了这一问题, 并在食品、化工行业得到了广泛应用^[1-2]。

对托盘箱进行仿真研究, 可以有效地缩短产品设

计周期, 降低生产成本。J. H. Lim 等人在对托盘静态力学性能进行分析时, 采用有限元法对其变形量进行了比较研究^[3]。Chun Hua Jian 通过试验数据, 利用 Solid edge 将通用木质平托盘进行了参数化设计, 然后进行了结构、尺寸、材料的优化, 最后得到最佳的方

收稿日期: 2014-01-07

作者简介: 王睿娜(1990—), 女, 土家族, 贵州铜仁人, 江南大学硕士生, 主攻现代物流工程与包装。

通讯作者: 卢立新(1966—), 男, 江苏徐州人, 博士, 江南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为食品包装技术与安全、运输包装等。

案,并进行了试验验证^[4]。王艳菊对施加特定的载荷在托盘上来模拟其承载性能进行了研究^[5]。张肖庆在 Ansys Workbench 环境下建立了结构模型,对 2 种可能的失效模式进行了模拟,分析了整体结构及螺栓连接在静态弯曲下的承载特性^[6]。李扬^[7]、丁毅^[8-9]等人利用有限元分析法对托盘结构进行了优化设计。虽然目前学者们把有限元理论引用到标准托盘的设计和优化中取得了一定成果,但很少针对个性化较强的金属托盘箱进行相关研究。国内文献中仅靳连金^[10]和刘春良^[11]等人对所设计的托盘箱进行了简单的有限元分析,但未进行相关试验对比验证。由此文中将采用 Solidworks 完成折叠式托盘箱的三维建模,再导入 Workbench 对其货架弯曲性能进行分析,根据模拟结果修改模型结果,直至满足要求后进行打样制造,然后进行货架弯曲实验,最后进行试验和模拟的对比验证。

1 模型的建立及有限元分析性

1.1 托盘箱建模

该折叠式托盘箱的额定载重为 1000 kg,外尺寸为 1200 mm×1000 mm×1015 mm。托盘箱包括:1 个底托盘、2 个侧框(通过螺栓和凸块与底托盘的包角形成限位固定)、2 个端框(通过连接机构连接在侧框上)和 5 块内衬板(通过塑料铆钉绑定在托盘箱上),见图 1。托盘箱主体部分采用 Q235 的薄壁方管和钢板焊接成形。根据前期有限元结构设计和优化的结果,侧框和端框的构架根据受力情况为非均匀分布,采用上疏下密、两端疏中间密的设置,底托盘的构件采用两端疏中间密的分布。由于其结构较为复杂,且具有可拆卸性,导致零部件之前会存在大量的非线性接触。如果完全按照实际情况进行仿真,则会求解很长时间,而且有可能结果不收敛,因此需要适当地简化模型^[12]。

托盘箱的各连接机构均为实心铸造件,按实际使用状况只会发生磨损现象,因此模型中将各连接机构略去,以相应的约束条件代替。端框通过连接机构连接在侧框上,对托盘箱货架弯曲性能影响不大,也可简化为相应的约束条件代替。因为托盘折叠箱为对称结构,所以只进行 1/4 的模型仿真。通常,托盘会进行长度方向和宽度方向抗弯性能的测

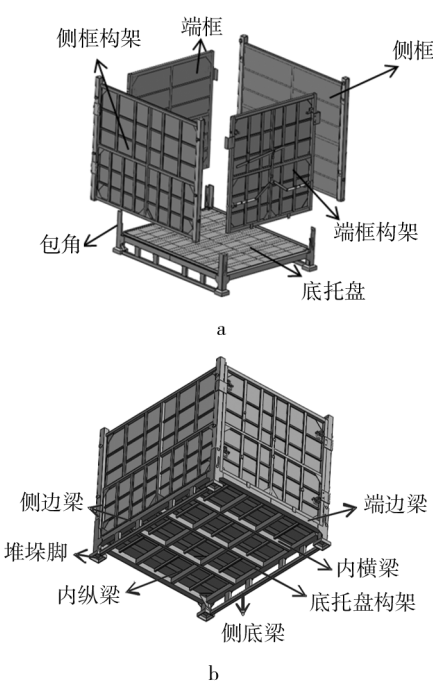


图 1 托盘箱结构
Fig.1 Box pallet construction

试,按 ISO 13194—2011 对托盘箱货架弯曲的要求,设计的托盘箱在测试其长度方向时是 4 个包角的堆垛脚支撑,测试宽度方向时是 4 个包角的堆垛脚和 2 条侧底梁共同支撑,按最严苛的长度方向进行试验。

托盘箱的相关材料参数见表 1。
表 1 托盘箱材料性能参数
Tab.1 Material property of the box pallet

材料	弹性模量 /MPa	强度 /MPa	泊松比	密度 /(g·cm ⁻³)
HDPE	1200	30	0.4101	0.952
Q235	200 000	235	0.3	7.85

1.2 网格设定

文中首先选用自动网格划分法,然后分别对模型的侧框架、底框架、侧板、底板、包角结构进行划分,网格尺寸分别为 5, 3, 5, 4, 3 mm。有限元模型由 4 884 439 个单元,2 259 086 个节点组成,网格质量平均值为 0.81,网格质量良好^[13]。

1.3 接触和约束条件

接触设定:底托盘各包角、底框架之间设置为绑定接触;侧框上侧内衬板和侧框架,底托盘上底内衬

板和底框架之间设置为摩擦接触,摩擦因数 0.18;立柱和底框架之间设置为摩擦接触,摩擦因数 0.15;塑料板和框架通过螺栓绑定连接的地方设置为不分离接触。

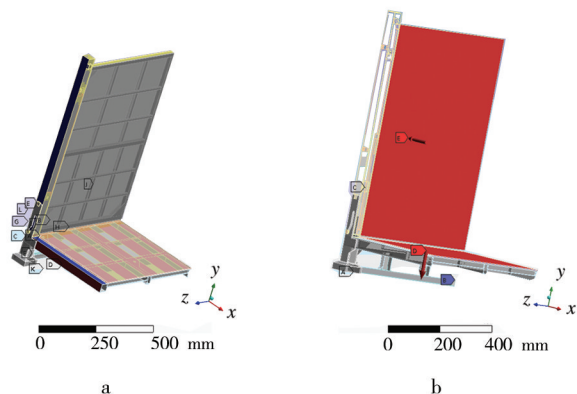


图2 托盘箱的接触和约束条件

Fig.2 Contact relation and constraint settings of the box pallet

约束条件:将侧框立柱上的端框连接销孔、包角的堆垛脚底面、对称面设置为无摩擦支持,底板面对应位置施加一定的力(如实例图中对 1/4 模型施加力为 2500 N,模拟托盘承载 1000 kg 的情况),侧板所受压力按散装货物库仑土压力(与货物堆积高度的二次方呈线性关系)施加在塑料板上。具体的接触和约束条件见图 2。

$$p = \frac{1}{2} \gamma g H^2 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{1}{2} \varphi \right) \quad (1)$$

式中: γ 为货物散堆密度, kg/m^3 ; H 为货物堆积高度, m ; φ 为货物的自然坡度角, rad ; g 为自由落体加速度, m/s^2 。

针对沙土类散货,式(1)中的参数^[14]选择 $\gamma = 1.36 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\varphi = 25^\circ$, $g = 9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

托盘箱总位移和等效应力见图 3。在托盘箱内装 1000 kg 货物时,托盘箱整体最大应力发生在底托盘的中间内纵梁上,为 129.83 MPa。最大挠度在塑料内衬板的中间位置,其变形量为 3.42 mm。托盘构架的最大应力(即整体最大应力)发生在底托盘的中间内纵梁上,为 129.83 MPa。最大挠度发生在底部无梁直接支撑的金属宽条板中间位置,其变形量为 2.30 mm。塑料内衬板的最大应力发生在中间螺栓绑定位置,为 1.69 MPa。最大挠度(即整体最大挠度)发生在塑料内衬板的中间位置,其变形量为 2.30 mm。

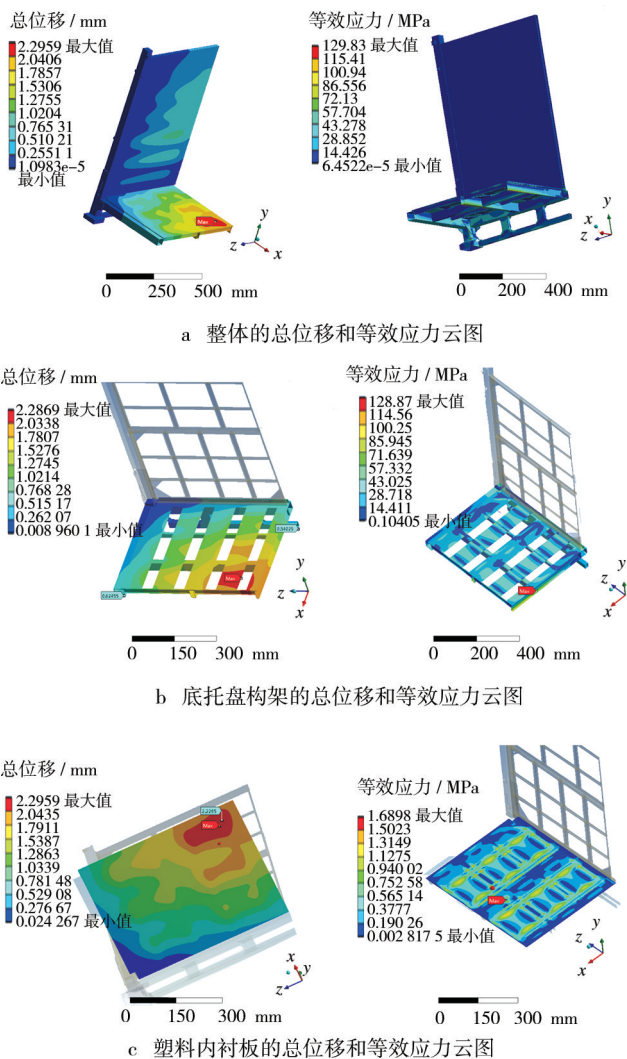


图3 托盘箱总位移和等效应力云图

Fig.3 Total displacement and stress contour of the box pallet

2 货架弯曲试验

2.1 样品

托盘箱试验样品和 Solidworks 模型一致,个数为 3 个。

2.2 仪器与设备

试验所用数显指示表由台湾数控工具有限公司生产,测试范围为 0 ~ 50 mm,分度值为 0.01 mm。

2.3 方法

托盘箱的货架弯曲试验参照 ISO 13194—2011^[15]。

1) 按图 4 所示要求摆放钢质箱式托盘。

2) 施加 10% 的试验载荷于钢质箱式托盘底座上,试验载荷应分布均匀,将百分表读数清零,然后逐步增加,直至施加全部试验载荷。

3) 保持此试验载荷 2 h 后,见图 4,在 A,B,C,D 等 4 点中挠度最大值发生处测量钢质箱式托盘底座的挠度 y_1 。

通常托盘会采用气袋弯曲,让底面均布受力。对于托盘箱,不便采用气袋弯曲进行试验,若将四壁拆除后对托盘底架采用气袋弯曲试验和实际使用的情况十分不符,于是采用在托盘箱内装模拟物(沙土)进行该项试验。

为了更好地得到实验值和有限元分析的模拟值之间的对比,将上述标准试验步骤(3)中测试的 4 个点增加为 9 个点(见图 1b,增加塑料板中心处 E,F ,金属宽条板中心处 G,H ,中心点 O)。

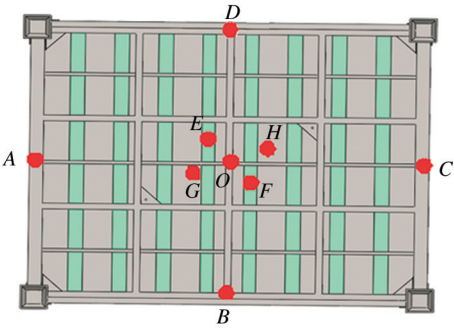


图 4 托盘箱弯曲试验

Fig. 4 Bending test of the box pallet

3 结果分析

3.1 有限元结果和试验的对比

托盘箱不同部位的试验和有限元分析的货架弯曲性能对比的数据见表 2。

为保持和实验的一致性,表 2 中的模拟值均为减去预载荷时挠度值后的结果。从实验值可以看出,随着载荷的增大,试验值和模拟值间的差值增加而相对误差减小。中心位置处的相对误差较小,这是由于结构的设计导致中心处受力均匀,中心点周围的挠度值近似导致误差小,这一点通过有限元分析的总位移云图可以更好地得到体现。另外,同一载荷时,挠度小的位置比挠度大的位置的相对误差大,这有 2 个原因:挠度值较小的,数值的波动对其影响较大;挠度小

表 2 托盘箱货架弯曲性能的试验和模拟的挠度值对比

Tab. 2 The comparison of displacement between test and simulation results of the box pallet

位置	载荷 /kg	实验均值 /mm	模拟均值 /mm	相对误差 /%
A,C 点	500	0.25	0.21	16.0
	1000	0.55	0.48	12.7
B,D 点	500	0.29	0.24	17.2
	1000	0.65	0.57	12.3
O 点	500	0.76	0.72	5.3
	1000	1.81	1.74	3.9
E,F 点	500	1.05	0.92	12.4
	1000	2.31	2.00	12.1
G,H 点	500	1.09	0.94	13.8
	1000	2.38	2.06	13.4

的位置,即长边和短边中点,该处为被动承力,其中点附近的挠度值波动较大(可以通过托盘构架的位移云图看出),另外百分表位置的摆放也存在人为误差。

经过 Workbench 模拟,托盘箱即使在承载 2500 kg 时最大挠度也只有 5.48 mm,远小于 ISO 13194—2011 规定 L_1 的 20% (20.8 mm)。由于其最大应力超过了屈服强度,而共用系统的频繁多次使用将极大地减少其生命周期,因此该托盘箱最好在承载 1500 kg (最大挠度为 3.20 mm,最大应力 193 MPa) 以内的条件使用。

3.2 误差分析

由表 2 可看出仿真分析能够较为真实地反映托盘箱的性能。托盘箱货架弯曲的试验值略大于有限元分析的模拟值,原因在于:模型简化,金属方管之间采用焊接方式,而三维模型中按绑定接触处理;零件间的装配,内衬板装配在托盘箱上不是完全平整的,加载时内衬板由翘曲变平有一个过程;样品加工,样品实际加工制造中造成的误差;边界条件的设定,模拟中箱子支撑部位为相应位置的一系列节点,然而实际试验过程中支撑部位及加载区域会随时变化^[16]。

4 结语

先根据有限元分析软件 Workbench 的模拟结果反复修改设计模型,直至满足要求,然后对托盘箱样品进行了货架弯曲试验,并与最后的模拟结果进行了

比较。模拟值与实验值总体上吻合度较高。另外,发现两者的相对误差随着试验载荷的增加而逐渐减小,并趋于稳定。证实使用 Workbench 对托盘箱的弯曲性能的评估是可行的,这对于更合理有效地设计和验证金属托盘箱的结构有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 高欣宝,武洪文,姚恺,等.可拆装箱式托盘在装备储运中的应用研究[J].包装工程,2009,30(11):26—27.
GAO Xin-bao, WU Hong-wen, YAO Kai, et al. Applied Research on Collapsible Box-style Pallet in Equipment Storage and Transportation[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(11):26—27.
- [2] 朱金华,姚金声.关于我国托盘标准化的几点思考[J].科技创新导报.2008(9):114.
ZHU Jin-hua, YAO Jin-shen. Some Thoughts About Pallet Standardization in Our Country[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008(9):114.
- [3] RATNAM M M, LIM J H, ABDUL KHALIL P S. Study of Three-dimensional Deformation of a Pallet Using Phase-shift Shadow Moiré and Finite-element Analysis[J]. Experimental Mechanics, 2005, 45(1):9—17.
- [4] JIANG Chun-hua, WANG Yu-long, XU Jie. CAE Analysis and Optimization Design for Mutual Flat Wooden Pallets[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 200:567—570.
- [5] 王艳菊,陆佳平.基于 ANSYS 的托盘弯曲承载特性分析及试验验证[J].包装工程,2012,33(17):1—4.
WANG Yan-ju, LU Jia-ping. ANSYS-Based Analysis of Pallet Bending Performance and Its Experimental Verification[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17):1—4.
- [6] 张肖庆,陆佳平,王艳菊,等.特定结构木塑托盘静态弯曲性能的研究[J].包装工程,2013,34(17):55—58.
ZHANG Xiao-qing, LU Jia-ping, WANG Yan-ju, et al. Analysis of Load Bearing Properties for the Lightweight Pallet Based on ANSYS Workbench[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(17):55—58.
- [7] 李扬,李光.基于 Solidworks 的托盘结构有限元分析及设计优化[J].包装工程,2011,32(19):23—26.
LI Yang, LI Guang. Structural Finite Element Analysis and Optimum Design of Pallet Via SolidWorks[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19):23—26.
- [8] 丁毅,苏杰,陈立民.基于 ANSYS Workbench 的轻质托盘承载性能分析[J].包装与食品机械,2012,30(2):67—69.
DING Yi, SU Jie, CHEN Li-min. Analysis of Load Bearing Properties for the Lightweight Pallet Based on ANSYS Workbench[J]. Packaging and Food Machinery, 2012, 30(2):67—69.
- [9] 丁毅,刘雯.基于 ANSYS 对木质托盘整体结构的静力分析[J].包装与食品机械,2009,27(6):12—13.
DING Yi, LIU Wen. ANSYS of Static Analysis for Wooden Pallet Based on the Structure[J]. Packaging and Food Machinery, 2009, 27(6):12—13.
- [10] 靳连金.CAE 技术在托盘箱设计中的应用[J].集装箱工业,2007,18(1):40—42.
JIN Lian-jin. Application of CAE Technology in the Tray Box Design[J]. Container Industry, 2007, 18(1):40—42.
- [11] 刘春良,倪建生,苏继军.CAE 技术在钢制折叠式托盘箱结构优化中的应用[J].集装箱化,2009,20(9):27—28.
LIU Chun-liang, NI Jian-sheng, SU Ji-jun. The Application of Optimizing the Structure of Folding Box Based on CAE[J]. Containerization, 2009, 20(9):27—28.
- [12] 刘恋.典型光伏组件的包装技术与关键包装结构优化研究[D].无锡:江南大学,2013.
LIU Lian. Research on Packaging Technology and Key Packaging Structure Optimization of Typical PV Modules[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [13] 许京荆.ANSYS 13.0 Workbench 数值模拟技术[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
XU Jing-jing. ANSYS Workbench 13.0 Numerical Simulation Technology[M]. Beijing: China Water Power Press, 2012.
- [14] 赵俊杰,鲁寨军,谢素超.散粒货物对铁道货车的侧、端墙动侧压力研究[J].铁道科学与工程学报,2012,9(6):1—5.
ZHAO Jun-jie, LU Zhai-jun, XIE Su-chao. Research on the Dynamic Lateral Pressure on Side and End Walls of Railway Wagon Car by Bulk Goods[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(6):1—5.
- [15] ISO 13194—2011, Box Pallets—principal Requirements and Test Methods[S].
- [16] 朱翔.一种循环复用木质包装箱及木托盘齿板拼接制造技术的研究[D].无锡:江南大学,2013.
ZHU Xiang. Research on a Recyclable Wooden Crate and Manufacturing Technology of Wooden Pallet splicing With Metal Plate[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.